

Herstellung geeigneter Testkörper für die Zuverlässigkeitsbewertung von Ultraschallprüfungen

Anne JÜNGERT¹, Adam GYULA¹, Stefan KEULER¹, Thomas HECKEL²,
Daniel BRACKROCK², Charleen LUPLOW²

¹ MPA Universität Stuttgart, Stuttgart

² Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung BAM, Berlin

Kontakt E-Mail: anne.juengert@mpa.uni-stuttgart.de

Kurzfassung. Heutzutage ist es nicht nur wichtig die Zuverlässigkeit zerstörungsfreier Prüfungen zu kennen, sondern für den Einzelfall auch quantifizieren zu können. Die Ermittlung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (POD, probability of detection) spielt dabei eine wichtige Rolle sowohl für die Sicherheitsbewertung kritischer Infrastruktur, als auch für die Einbindung zerstörungsfreier Prüfungen in automatisierte Herstellungsketten. Die grundsätzliche Vorgehensweise zur Ermittlung von PODs für verschiedene Prüfverfahren wird gerade in einen nationalen Normentwurf beim DIN, im NMP 062-08-28 umgesetzt. Hier werden von der Versuchsplanung bis zur Berechnung der POD alle Arbeitsschritte beschrieben.

Die Ermittlung einer POD auf Basis experimenteller Untersuchungen, erfordert die Herstellung geeigneter Testkörper und entsprechende Vorüberlegungen, die an die zu bewertende Prüfaufgabe angepasst sein müssen. Im Rahmen des Vorhabens normPOD wurden Testkörper hergestellt, die als Beispiel für die POD-Ermittlung von Ultraschallhandprüfungen an ferritischen Schweißnähten dienen sollten. Im Folgenden geht es um die Umsetzung der Herstellung der Testkörper, und das Einbringen von definierten Fehlstellen. Die exakte Platzierung und Ausformung von Fehlstellen mit konventionellen Herstellungsverfahren wie dem Funkenerodieren ist in der Praxis kompliziert. Die Grenzen der so hergestellten Testkörper im Hinblick auf die zerstörungsfreie Prüfung werden hier diskutiert. Ebenfalls wird diskutiert, inwieweit neue Fertigungsverfahren, wie z.B. die additive Fertigung über selektives Laserschmelzen, die Testkörperherstellung verbessern und vereinfachen können. Hierfür wird zum Vergleich ebenfalls ein Testkörper mit definierten Fehlstellen hergestellt.

Nach Fertigstellung der Testkörper, werden zunächst die Fehlerlagen über eine Durchstrahlungsprüfung verifiziert. Anschließend werden die Testkörper von verschiedenen Personen unterschiedlicher Qualifizierung mit Ultraschall entsprechend der geltenden Regelwerke geprüft und die Ergebnisse strukturiert erfasst für eine spätere POD-Berechnungen.

Einführung

Die Ermittlung der Zuverlässigkeit zerstörungsfreier Prüfverfahren spielt für Prüfungen an sicherheitsrelevanten Komponenten ebenso eine große Rolle wie bei der Optimierung von automatisierten Herstellungsmethoden. POD-Kurven, die die Fehlerauffindwahrscheinlichkeiten zerstörungsfreier Prüfverfahren mit Fehlergrößen in



Beziehung setzen, haben sich zur Darstellung der Zuverlässigkeit etabliert [1]. Die Ermittlung der POD-Kurven erfordert eine gewisse Anzahl unabhängiger Ergebnisse aus physischen Experimenten oder Simulationen [2]. Die experimentelle Ermittlung von POD-Kurven hat gegenüber der Ermittlung aus Simulationen den Vorteil, dass reale Streuungen der Messergebnisse aufgrund von Umgebungsbedingungen und menschlichen Faktoren in der POD bereits enthalten sind und die POD so eine realistische Quantifizierung der Prüfungen in der Praxis darstellt. Zur Ermittlung der experimentellen POD, benötigt man allerdings eine Vielzahl von Prüfkörpern und unabhängigen Experimenten. Hier ist darauf zu achten, dass die Fehlergrößen so gewählt werden, dass die Anforderungen für die POD-Berechnungen sinnvoll erfüllt sind. Die Größe der Fehlstellen ist so zu wählen, dass eine statistische Verteilung von gefundenen und nicht gefundenen Fehlstellen möglich ist. Gleichzeitig muss berücksichtigt werden, dass zerstörungsfreie Prüfungen entsprechend geltender Normen und Regelwerke durchgeführt werden. In den Normen sind in der Regel Registrier- und Zulässigkeitsgrenzen von Fehlstellen festgelegt, die für unterschiedliche Einsatzzwecke der Bauteile und Komponenten unterschiedlich sind [3].

Die Ultraschallprüfung von Schweißnähten ist ein etabliertes Verfahren und ist in der DIN EN ISO 17640 [4] beschrieben. Die Zulässigkeitsgrenzen für die Ultraschallprüfung finden sich in DIN EN ISO 11666 [5]. Die Charakterisierung der Fehlstellen ist in DIN EN ISO 23279 [6] dargestellt. Obwohl Ultraschallprüfungen bereits seit Jahrzehnten zur Schweißnahtprüfungen eingesetzt werden, ist die Zuverlässigkeit der Prüfaussage nicht ausreichend quantifiziert. Die Zuverlässigkeit mit der ein Fehler gefunden und richtig vermessen wird, spielt eine zunehmend große Rolle, wenn Komponenten über die Auslegungslbensdauer hinaus betrieben werden sollen oder beim Neubau materialoptimiert geplant wird.

Ebenfalls sind in den Normen die zu verwendenden Prüfgeräte und Prüfköpfe definiert [7, 8]. Im Hinblick auf die Ultraschallprüfung bedeutet das, dass neben der zu verwendenden Wellenart außerdem die Frequenzen und Schwingerdurchmesser der Ultraschallprüfköpfe vorgegeben sind. Das ist bei der Planung der Testkörper ebenfalls zu berücksichtigen, da die Fehlerauffindwahrscheinlichkeit je nach Fehlerlage und -größe je nach verwendetem Prüfkopf deutlich abweichen kann. Hier werden bisher lediglich die Unterschiede verschiedener Prüfköpfe berücksichtigt. Zusätzlich weichen auch die Prüfergebnisse baugleicher Prüfkopfmodelle voneinander ab, was einen Teil der Unsicherheiten bei der Bestimmung einer POD ausmacht [9]. Ein Testkörpersatz für die Ermittlung einer POD muss also an die geltenden Regelwerke angelehnt werden.

Die Herstellung geeigneter Fehlstellen ist für die Qualifizierung zerstörungsfreier Prüfverfahren schon lange ein wichtiges Thema. In den letzten Jahren wurde die Herstellung künstlicher Fehlstellen im Hinblick auf die Ermittlung einer POD erneut wichtig. Untersuchungen zu verschiedenen Fehlertypen und zur Verwendung virtueller Fehlstellen wurden z.B. in [10, 11] durchgeführt. Die Verwendung künstlicher Fehlstellen hat gegenüber realistischen Fehlstellen den entscheidenden Vorteil, dass Größe und Lage genau bekannt sind. Realistische Fehlstellen, wie echte Risse und Schweißfehler haben den Nachteil, dass deren genaue Abmessungen in der Regel nur zerstörend ermittelt werden können [3].

1. Herstellung von Testkörpern mit erodierten Fehlstellen

Zur Ermittlung einer experimentellen POD wurden Testkörper mit künstlichen Fehlstellen geplant. Die Testkörper sollten eine Schweißnahtprüfung repräsentieren, deshalb wurden zunächst Rohrleitungsschweißnähte mit 273 mm Durchmesser und einer Wandstärke von 14,2 mm hergestellt. Im Anschluss daran sollten Flachbodenbohrungen in die Schweißnahtflanken eingebracht werden. Die eingebrachten Reflektoren sollten als

Referenzreflektoren für Poren und Bindefehler in der Herstellung der Schweißnähte dienen. Die schematische Darstellungen der einzubringenden Reflektoren an den Fehlstellen sind in Abbildung 1 zu sehen. Die Kreisscheibenreflektoren sollen über eine Umlenkung, bzw. direkt angeschallt werden. Der Prüfkopf kann sich hierfür nur in einem sehr eng abgesteckten Bereich bewegen, da ansonsten der Bohrkanal direkt angeschallt wird und sehr starke Reflexionen erzeugt. Für Blindtests stellt dieser Aufbau also zusätzliche Anforderungen an die Prüfaufsicht, um zu gewährleisten, dass nur der Kreisscheibenreflektor angeschallt und bewertet wird.

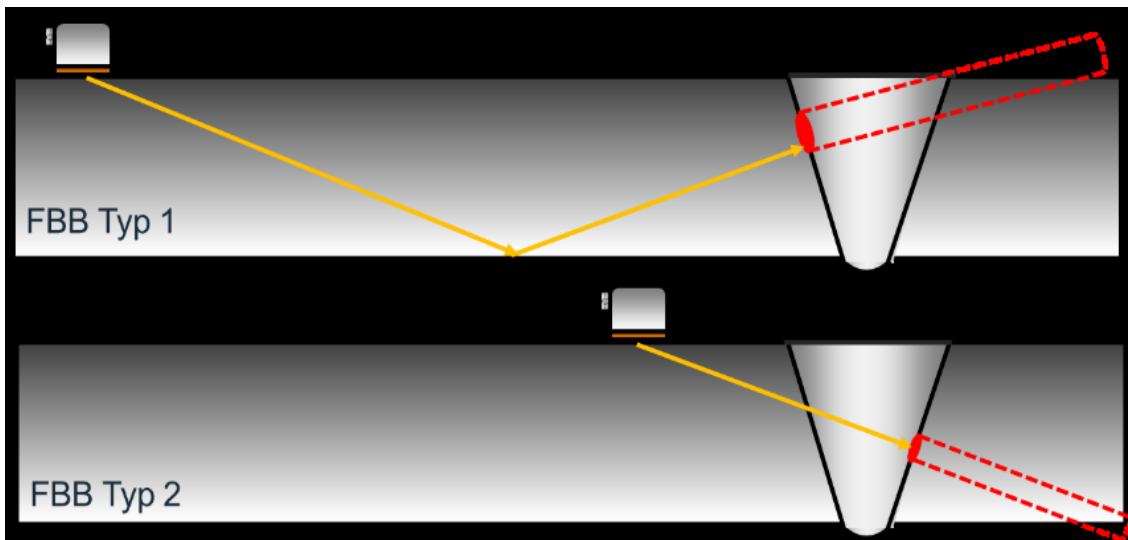


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Flachbodenbohrungen [3]

Die Lage der Bohrungen wurde über Durchstrahlungsaufnahmen verifiziert. Ein Beispiel einer Durchstrahlungsaufnahme von drei der eingebrachten Bohrungen vom Typ 1 findet sich in Abbildung 2. Die Bohrungen bilden sich als dunkle Bereiche ab. Es ist zu erkennen, dass die Bohrkanäle unterschiedlich lang sind. Das bedeutet, dass die Kreisscheibenreflektoren in unterschiedlicher Tiefe der Schweißnaht liegen. Eine leichte Verzerrung, bedingt durch die Rohrgeometrie ist ebenfalls im Bild zu erkennen. Mithilfe der Röntgenaufnahmen konnte die Lage und Tiefe der Bohrungen nachvollzogen werden.

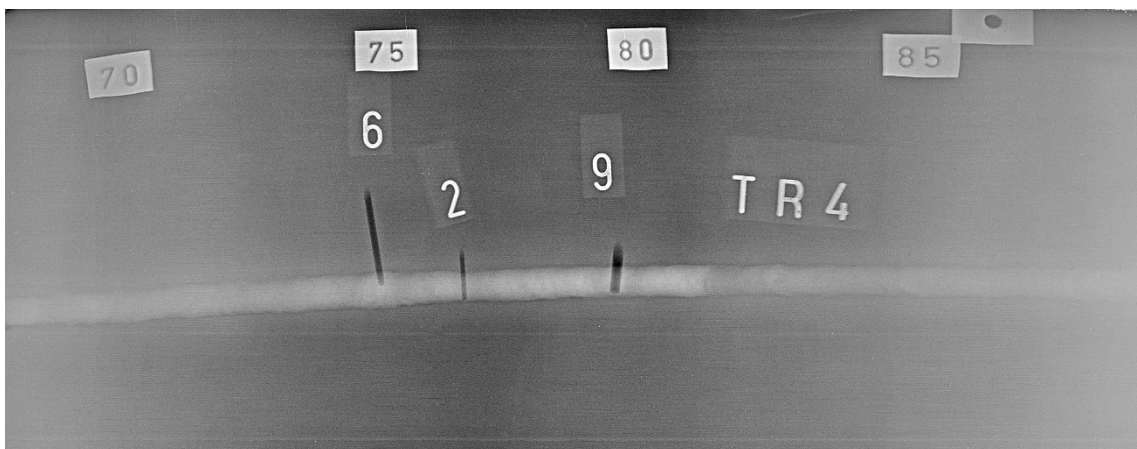


Abbildung 2: Durchstrahlungsaufnahme einer Rohrleitungsschweißnaht mit eingebrachten Bohrungen mit unterschiedlichem Durchmesser und unterschiedlicher Tiefe

Im Anschluss an die Herstellung wurden Ultraschallhandprüfungen nach Norm durchgeführt, um die Reflektoren zu verifizieren. Hierbei stellte sich heraus, dass insbesondere die Reflektoren mit kleinem Durchmesser, schwieriger zu detektieren waren,

als erwartet. Dies ist darauf zurück zu führen, dass die Formen der Fehlstellen herstellungsbedingt von idealen Kreisscheibenreflektoren abweichen. Die Erodier Elektrode ist zunächst flach abgeschnitten. Im Erodierprozess rundet sich die Elektrode ab. Entsprechend rundet sich auch das erodierte Loch an der Spitze ab. Man erzeugt also keine idealen Kreisscheibenreflektoren, sondern angerundete Reflektoren. Die Rundung der Kanten hat einen größeren Einfluss, je kleiner die Reflektorgröße ist. Eine Möglichkeit zur Verbesserung ist das Nachschärfen der Elektrode kurz vor Erreichen der Ziellänge. Hierbei kann es jedoch passieren, dass man zusätzliche Kanten erzeugt und die Abweichung vom idealen Reflektor noch größer wird. Für die erodierten Fehlstellen wurden jeweils die Erodier Elektroden aufbewahrt, um nachträglich einen Anhaltspunkt über die tatsächliche Form des Kreisscheibenreflektors zu erhalten. In Abbildung 1 sind Aufnahmen der Formen der Elektrodenenden für eine 1,5 mm Elektrode, eine 0,8 mm Elektrode und eine 0,6 mm Elektrode zu sehen. Es wird deutlich, dass die 1,5 mm Elektrode eine sehr gute Näherung eines Kreisscheibenreflektors darstellt und nur leicht an den Kanten abgerundet ist. Die 0,8 mm Elektrode zeigt gegenüber einem idealen Kreisscheibenreflektor deutliche Verformungen. Ein entsprechendes Bohrloch zeigt entsprechend ein anderes Reflexionsverhalten als ein idealer Kreisscheibenreflektor mit Durchmesser 0,8 mm. Die Schallenergie wird weniger gut zurück reflektiert und der Reflektor entsprechend unterschätzt.

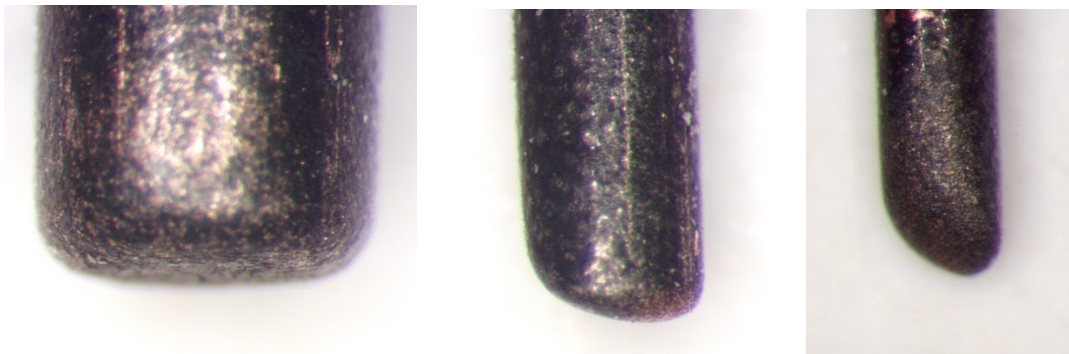


Abbildung 3: Enden der Erodier Elektroden nach der Herstellung einer 1,5 mm Bohrung (links) und einer 0,8 mm Bohrung (mitte) und einer 0,6 mm Bohrung (rechts)

Die starken Abweichungen des Reflexionsverhaltens müssen für die Planung von Testkörpersätzen künftig berücksichtigt werden. Für eine POD-Analyse aus Experimenten nach der Norm zur Ultraschallprüfung von Schweißverbindungen DIN EN ISO 17640 [4] Ebenso muss das verminderte Reflexionsverhalten bei der statistischen Zuordnung für die POD-Analyse einkalkuliert werden. So ist ein Kreisscheibenreflektor, der mit einem Durchmesser von 1,2 mm geplant war, letztendlich aber nur wie ein Reflektor mit Durchmesser 0,8 mm reflektiert, entsprechend der realen Signalantwort auf der x-Achse der POD-Kurve einzuordnen.

2. Ultraschallprüfung

An einem wie beschrieben hergestellten Testkörper mit erodierten Flachbodenbohrungen, wurden durch die BAM Ultraschallprüfungen durchgeführt. Die Ultraschallprüfungen fanden zunächst entsprechend der Regelwerke mit verschiedenen 60 °, 4 MHz Prüfköpfen (MWB60-4) als Handprüfungen statt. In [9] konnte gezeigt werden, dass die Amplitudenunterschiede zwischen einzelnen baugleichen Prüfköpfen relevante Abweichungen ergeben können. Deshalb wurden hier mehrere baugleiche Prüfköpfe verwendet und für die anschließende mechanisierte Prüfung zwei Prüfköpfe mit

unterschiedlichen Eigenschaften ausgewählt. Die Prüfung fand nicht als Blindtest statt, d.h. den Prüfpersonen waren Lage und Größe der Reflektoren bekannt. Es wurden alle Reflektoren dokumentiert unabhängig davon, ob sie nach Regelwerk registrierpflichtig sind. Die Prüfung an den Testkörpern ist durch die Randbedingung erschwert, dass ausschließlich den Kreisscheibenreflektor angeschallt werden soll. Wird der Prüfkopf über den Bohrkanal bewegt, wird der Bohrkanal direkt angeschallt und stellt einen starken Reflektor dar. Ebenfalls kann der Bohrkanal angeschallt werden, wenn der Prüfkopf sich zu weit vom Kreisscheibenreflektor entfernt. Der Scanbereich des Prüfkopfes ist deshalb stark zu begrenzen.

Bei den Handprüfungen konnten alle 13 Fehlstellen im Rohr detektiert werden. Eine Ersatzreflektorgröße wurde aus den Signalamplituden bestimmt. In Abbildung 5 sind die so ermittelten Ersatzreflektorgrößen gegenüber den Sollreflektorgrößen dargestellt. Es ist zu sehen, dass bei den mit Ultraschall ermittelten Ersatzreflektorgrößen die Sollfehlergrößen systematisch unterschätzt werden. Lediglich für den kleinsten Reflektor wird seine Größe überschätzt.

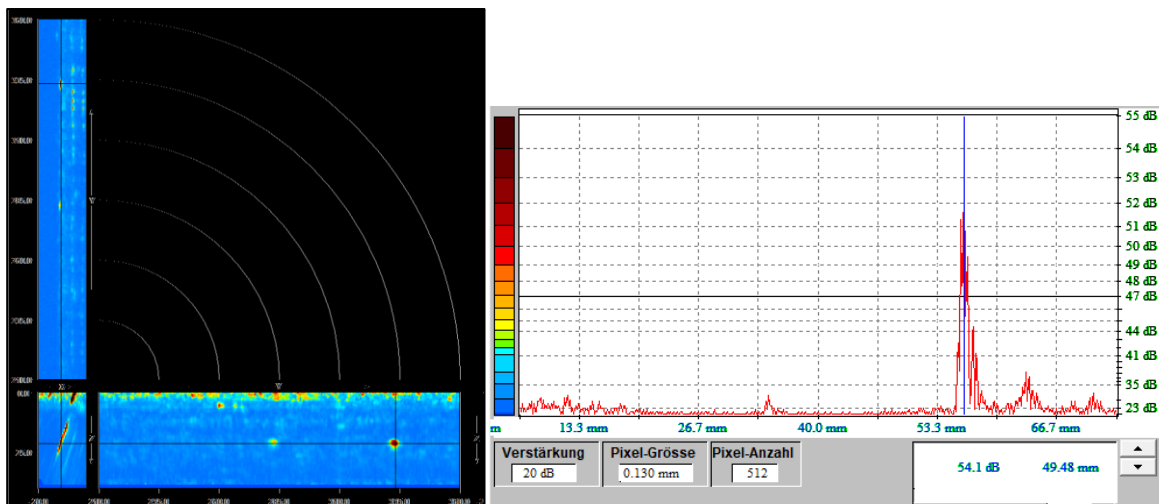


Abbildung 4: Ergebnisse der mechanisierten Prüfung an Kreisscheibenreflektor mit Durchmesser 1,5 mm

Die Ergebnisse der Handprüfung sollten anschließend in einer mechanisierten Prüfung bestätigt werden. Die mechanisierte Prüfung findet mit gleichzeitiger Wegaufzeichnung statt, was eine bildgebende Darstellung der Reflektoren ermöglicht. Dies ist in Abbildung 4 exemplarisch für einen Reflektor dargestellt. Links im Bild sind die Seitenansichten und die Draufsicht auf die Fehlstelle dargestellt. Hier lassen sich gut die Reflektorpositionen und Reflektortiefen ablesen. Rechts in der Abbildung ist das zur markierten Fehlstelle gehörende A-Bild dargestellt. Aus dem A-Bild kann die Amplitude abgelesen werden und über das AVG Diagramm des Prüfkopfes eine Ersatzreflektorgröße ermittelt werden.

Bei der mechanisierten Prüfung wurden lediglich die Fehlstellen mit Durchmessern von weniger als 2 mm untersucht. Die ermittelten Ersatzreflektorgrößen sind ebenfalls in Abbildung 5 dargestellt. Hier fällt auf, dass die mechanisierte Prüfung mit einem der Prüfköpfe die Reflektorgrößen für die Fehlstellen mit Durchmessern kleiner als 1,5 mm tendenziell überschätzt. Die restlichen Prüfungen unterschätzen die Reflektorgrößen in vergleichbarem Maß wie die Handprüfungen.

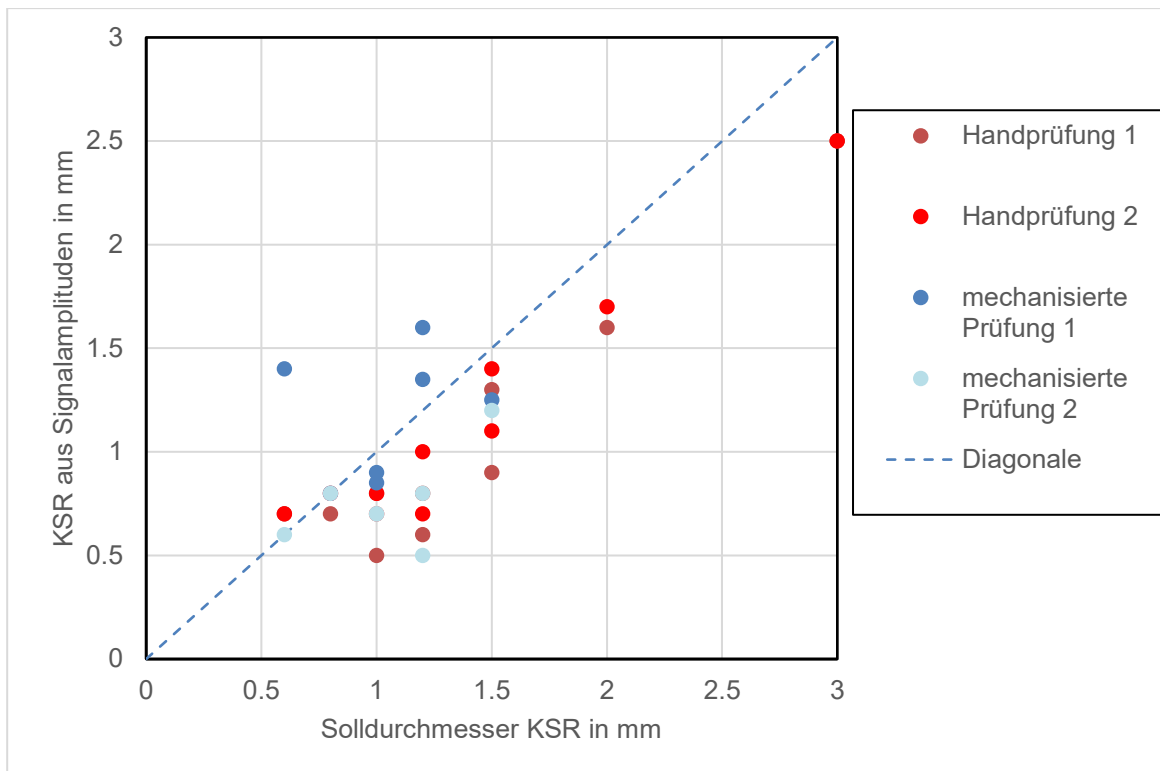


Abbildung 5: Vergleich der Solldurchmesser mit den aus den Amplituden ermittelten Kreisscheibenreflektorgrößen

3. Planung der Herstellung weiterer Testkörper

Die Herstellung von Referenzfehlern über Funkenerodieren ist ein etabliertes Verfahren. Jedoch zeigte sich, dass es für die Herstellung komplexerer Fehlstellen, wie geneigter Kreisscheibenreflektoren nur bedingt geeignet ist. Hier können fortgeschrittene Fertigungsverfahren Abhilfe schaffen. Eine Möglichkeit zum Einbringen von definierten Fehlstellen ist z.B. über das Diffusionsschweißen möglich. Beim Diffusionsschweißen werden Komponenten mittels Druck und Hitze im Vakuum dazu gebracht, sich miteinander zu verbinden. Im Vorfeld eingefräste oder erodierte Fehlstellen bleiben hierbei erhalten.

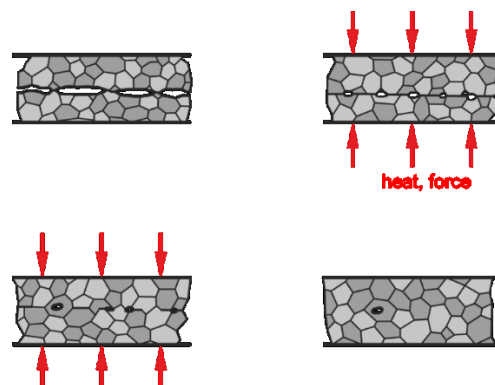


Abbildung 6: Funktionsweise Diffusionssschweißen

Eine weitere Möglichkeit zum Einbau definierter Fehlstellen in Prüfstücke ist die additive Fertigung von Testkörpern. Erfolgreich ließen sich über Pulverbettverfahren Aluminium-Testkörper mit unterschiedlichen Fehlstellen erzeugen [12]. Die Kornstruktur im additiv hergestellten Aluminium ist sehr feinkörnig. Dies liefert für die Ultraschallprüfung gute Bedingungen. Für Inconel 718 wurden ebenfalls bereits Untersuchungen an

verschiedenen Reflektortypen durchgeführt [13]. Bei der additiven Fertigung von Stählen, kann die Kornstruktur durch den Fertigungsprozess im Hinblick auf die Ultraschallprüfung ungünstig beeinflusst werden. Eine entsprechende Wärmebehandlung führt für bestimmte Stähle zu einer mit geschmiedeten Werkstoffen vergleichbaren Mikrostruktur [14]. Dies ist jedoch nicht für alle Stähle möglich.

Als nächstes werden aktuell Testkörper aus ferritischem Stahl gefertigt, die Kreisscheibenreflektoren mit unterschiedlichen Durchmessern und unterschiedlicher Neigung enthalten sollen. Ziel ist das Reflexionsverhalten in Bezug auf die Herstellungseinflüsse zu untersuchen, z.B. die Neigung des Kreisscheibenreflektors zur Bauachse, die Größe des erzeugten Hohlraums, eventuell vorhandene Pulverreste. Weitere Einflussfaktoren sind die Oberflächenbeschaffenheit und die Mikrostruktur vor und nach Wärmebehandlung.

4. Zusammenfassung und Diskussion

Im Beitrag wurde die Herstellung von Testkörpern mit Testfehlern für die Ultraschallprüfung erläutert. Ziel war die Herstellung von Kreisscheibenreflektoren, die eine spätere Zuverlässigkeitsbewertung der Prüfverfahren erlauben. Hierfür ist es notwendig die Fehlergrößen genau zu kennen. Im ersten Schritt wurden die Kreisscheibenreflektoren mit einem üblichen Verfahren, dem Funkenerodieren, in einen Testkörper eingebracht. Die Durchmesser der Kreisscheibenreflektoren lagen dabei zwischen 0,6 mm und 3 mm.

Eine anschließende Ultraschallprüfung der so erzeugten Fehlstellen ergab, dass die Fehlstellen durch die Ultraschallprüfung tendenziell unterschätzt werden. Die Abweichung vom idealen Kreisscheibenreflektor aufgrund des Herstellungsverfahrens, erklärt diese Abweichung. Diese Abweichung muss bei der Planung von Fehlstellen für die Zuverlässigkeitsbewertung berücksichtigt werden. Ebenfalls muss für die Darstellung über POD-Kurven das reale Reflexionsverhalten der Testfehler als Fehlergröße angenommen werden. Die Untersuchungen lieferten hier wichtige Erkenntnisse für künftige Planungen von Testkörpersätzen.

Im nächsten Schritt werden neuartige Herstellungsverfahren für die Testkörperherstellung in Betracht gezogen. Bei der Verwendung von Pulverbettverfahren und selektivem Laserschmelzen ergeben sich weitere Fragestellungen zur Auswirkung der Herstellungsprozesse auf die Reflektivität von Fehlstellen. Diese sollen in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

Literatur

- [1] L. Gandossi und C. Annis, „ENIQ TGR Technical Document - Probability of Detection Curves: Statistical Best Practices,“ EUR 24429 EN Joint Research Centre - Institute for Energy, 2010.
- [2] C. P. Annis, „Department of Defense Handbook: Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment,“ 2009.
- [3] A. Jüngert, T. Heckel, V. Tkachenko, M. Bertovic, J. Vrana und D. Kanzler, „POD, aber wie? Konzeption und Herstellung von Testkörpersätzen und Prüfvorschriften für die experimentelle Zuverlässigkeitsbestimmung von ZfP-Prüfansätzen,“ in *Jahrestagung 2022*, Kassel, DGZfP, Hg., 2022.
- [4] *17640 Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen – Ultraschallprüfung – Techniken, Prüfklassen und Bewertung (ISO 17640:2018)*, DIN EN ISO 17640, DIN, Nov. 2018.

- [5] *Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen – Ultraschallprüfung- Zulässigkeitsgrenzen (ISO 11666:2018)*, DIN EN ISO 11666, DIN, Mai. 2018.
- [6] *Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen – Ultraschallprüfung – Charakterisierung von Inhomogenitäten in Schweißnähten (ISO 23279:2017)*, DIN EN ISO 23279, DIN, Dez. 2017.
- [7] *Zerstörungsfreie Prüfung - Charakterisierung und Verifizierung der Ultraschall- Prüfausrüstung - Teil 1: Prüfgeräte (ISO 22232-1:2020)*, EN ISO 22232-1, ISO, Sep. 2021.
- [8] *Zerstörungsfreie Prüfung - Charakterisierung und Verifizierung der Ultraschall- Prüfausrüstung - Teil 2: Prüfköpfe (EN ISO 22232-2: 2020-09)*, EN ISO 22232-2, ISO, Sep. 2020.
- [9] T. Heckel *et al.*, „Der Unterschied zwischen Simulation und Praxis Einfluss von Toleranzen im Ultraschallprüfsystem und deren Berücksichtigung,“ in *Jahrestagung 2022*, Kassel, DGZfP, Hg., 2022.
- [10] I. Virkkunen, U. Ronneteg und T. Grybäck, „Feasibility study of using eFlaws on qualification of nuclear spent fuel disposal canister inspection.,“ in *12th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components*, Dubrovnik, Croatia, 2016.
- [11] K. Markulin, M. Vavrous, M. Kemppainen, I. Virkkunen, R. Paussu und J. Pirinen, „Effect of the different artificial flaw type in qualification purposes from the point of view of the inspection company,“ in *10th International Conference on NDE in relation to structural Integrity for nuclear and pressurized components (www.10thnde.com)*, Cannes, France, 2013.
- [12] C. Weidig und C. Straube, „Additive Herstellung von Prüfobjekten für die ZfP- Ausbildung - eine Chance?,“ in *Jahrestagung 2022*, Kassel, DGZfP, Hg., 2022.
- [13] O. Nemitz, T. Schmitte, M. Cembrowski, T. Orth, S. Rott und J. Bamberg, „Kalibrierung des TFM-Verfahrens mittels additiv gefertigter Kalibrier-Reflektoren und Vergleich mit Simulationen,“ in *DACH Jahrestagung 2019*, Friedrichshafen, DGZfP, Hg., 2019.
- [14] L. Mally, M. Werz und S. Weihe, „Feasibility Study on Additive Manufacturing of Ferritic Steels to Meet Mechanical Properties of Safety Relevant Forged Parts,“ *Materials (Basel, Switzerland)*, Early Access. doi: 10.3390/ma15010383.